

<研究テーマ> 腐食抵抗性・構造安全性のために溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材の付着力予測に関する研究

東京理科大学 理工学部 建築学科 チェ ホンボク

1. はじめに

溶融亜鉛めっき鉄筋(以下、めっき鉄筋)は、母材となる鉄筋(以下、母材)の表面に形成された亜鉛皮膜が、保護皮膜作用に加え犠牲防食効果により母材を腐食から守る鉄筋である。近年では、鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化が指向される中で、耐久性向上技術として改めてめっき鉄筋が見直されている。その結果、構造性能において、健全時のめっき鉄筋は普通鉄筋と同等の耐力を有することを、腐食時のめっき鉄筋は亜鉛腐食物が付着力の向上に寄与することを確認している。

一方で、亜鉛皮膜の膜厚は約100~150 μm であるが、部位によって膜厚のばらつきが存在する。このうち、異形のめっき鉄筋は、節部付近の膜厚が平滑部に比べ大きいため、鉄筋表面における平滑部と節部の間は黒鉄筋に比べ滑らかな節形状になりやすい。しかし、構造耐力においてはコンクリートとめっき鉄筋間の適切な付着力の確保が必要であるが、節形状の違いおよびコンクリート品質におけるめっき鉄筋の付着性能は明確に整理されていないのが現状である。例えば、めっき鉄筋は亜鉛皮膜の影響によって十分な付着力を発揮しないことが懸念されるものの、コンクリート強度(以下、圧縮強度)が高い、水セメント比が低いなどの条件によって十分な付着力を示す結果も多数報告されている。このため、めっき鉄筋の付着機構はまだ不明な点が残っている。

そこで本研究では、健全状態のめっき鉄筋を対象に、めっき鉄筋の付着力に影響する要因としてコンクリート品質(圧縮強度、水セメント比、単位水量)および節形状(クロス節、竹節)の違いが及ぼす付着挙動の解明を目的とする。研究方法として、建材試験センター規格「JSTM C 2101T」による引抜き試験を行い、上記の要因が有する最大付着応力度、初期付着応力度、最大付着応力度時変形との関係性を評価する。

2. 研究概要

表1に試験体水準一覧を、表2に各水準におけるコンクリートの調合を示す。試験体水準について、コンクリート品質は水セメント比および単位水量から定め、節形状はクロス節と竹節の2水準とした。一方、既往の研究ではコンクリート品質がよい条件ではめっき鉄筋の付着力に問題が発生しないことを確認している。この点を踏まえ、本研究では、付着低下の原因を特定するためにコンクリート品質が悪いと想定される条件における付着性能を評価する。日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説JASS5鉄筋コンクリート工事」を参考し、水セメント比または単位水量が規定範囲(水セメント比65%以下、単位水量185 kg/m^3 以下)を外れる条件を有するコンクリートを水準として設けた。なお単位セメント量は、水セメント比と単位水量によって一部の水準では規定範囲(270 kg/m^3 以上)を満足しないことになった。

図1に試験体概要および付着試験概要を示す。試験体は建材試験センター規格「JSTM C 2101T」に準ずるものとした。D16の異形鉄筋を用い、付着区間は4D(=64mm)、非付着区間は約2D(=36mm)とした。また、コンクリート内部にらせん筋をともに埋め込み、付着試験時のコンクリートが圧縮破壊しないようにした。また、コンクリートは封かん養生し、材齢28日を経過したもので付着試験を実施した。付着試験は、純引張応力を受ける載荷とし、付着区間は両端とも拘束されていない状態である。鉄筋滑りは自由端側から変位計を取り付けて測定を行う。また、付着応力度 τ は、引張加重 P を付着面積 S に乗じて算出した($\tau = P \times (\pi \times D \times L)^{-1}$)。ここで、 D は鉄筋径、 L は付着長さである。

表1 試験体水準一覧

赤字：規定外範囲 青字：規定範囲内

水準	水セメント比	単位水量	単位セメント量	節形状
	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	
	W/C	W	C	
1	58.5	166.5	284.62	竹節・クロス節
2	58.5	185	316.24	竹節・クロス節
3	58.5	203.5	347.86	竹節・クロス節
4	58.5	222	379.49	竹節・クロス節
5	71.5	166.5	232.87	竹節・クロス節
6	71.5	185	258.74	竹節・クロス節
7	71.5	203.5	284.62	竹節・クロス節
8	71.5	222	310.49	竹節・クロス節
9	84.5	166.5	197.04	竹節のみ
10	84.5	185	218.93	竹節のみ
11	84.5	203.5	240.83	クロス節のみ
12	84.5	222	262.72	クロス節のみ

表2 試験体水準におけるコンクリートの調合

水準	水セメント比	細骨材率	単位水量	質量 (kg/m ³)			AE剤	
	%	%	kg/m ³	セメント	粗骨材	細骨材(砕砂)	kg/m ³	C×
1	58.5	46.21	166.5	284.62	1014.34	848.84	0.00	0.00%
2	58.5	43.92	185.0	316.24	1014.34	773.86	3.16	1.00%
3	58.5	41.43	203.5	347.86	1014.34	698.89	1.74	0.50%
4	58.5	38.71	222.0	379.49	1014.34	623.91	0.95	0.25%
5	71.5	48.26	166.5	232.87	998.49	907.34	0.02	0.01%
6	71.5	46.26	185.0	258.74	998.49	837.15	0.02	0.008%
7	71.5	44.09	203.5	284.62	998.49	766.97	0.03	0.01%
8	71.5	41.74	222.0	310.49	998.49	696.78	0.03	0.01%
9	84.5	49.07	166.5	197.04	998.49	937.16	0.02	0.01%
10	84.5	47.22	185.0	218.93	998.49	870.28	0.02	0.01%
11	84.5	45.24	203.5	240.83	998.49	803.41	0.02	0.01%
12	84.5	43.09	222.0	262.72	998.49	736.53	0.03	0.01%

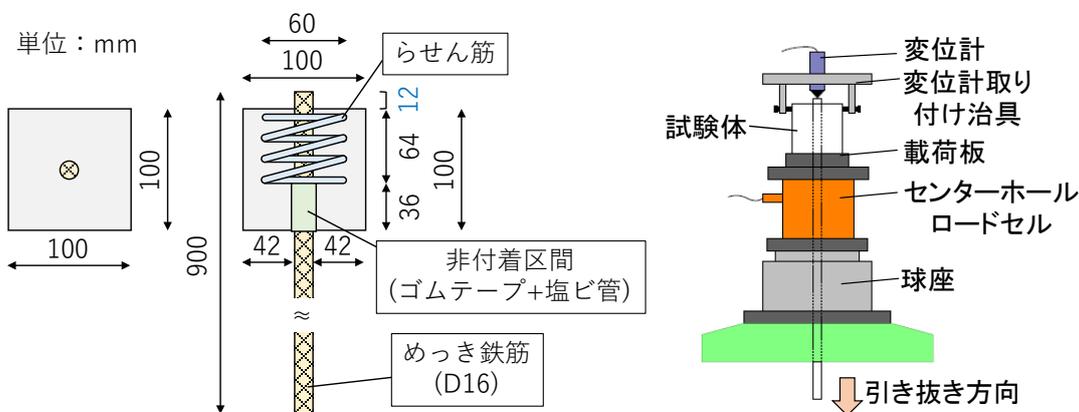


図1 試験体概要 (左図) および付着試験概要 (右図) (D16の異形鉄筋を使用)

3. 結果と考察

3.1 最大付着応力度と圧縮強度の関係

図2に全試験体における最大付着応力度の平均と圧縮強度の関係を、図3に節形状の違いにおける各水準の最大付着応力度の平均と圧縮強度の関係を示す。図2と図3において、凡例の基準値はJSTMC 2101Tで定めている最大付着応力度の基準値（7.8N/mm²以上）を示し、S1～S12は水準名を示す（水準1～水準12）。

図2の結果から、めっき鉄筋における最大付着応力度と圧縮強度は正の関係にあることを確認した。この関係は黒鉄筋と同様である。節形状の違いにおける近似式の傾きの差を確認した結果、同等の圧縮強度における最大付着応力度は竹節がクロス節に比べ約1.14倍大きい。この挙動は黒鉄筋とも同様であることを確認できた。また、近似式と基準値の交点を算出した結果、基準値の最大付着応力度を確保するための圧縮強度は、クロス節では約16.7N/mm²以上、竹節では約13.1N/mm²以上必要であることが確認された。設計基準強度の最小値が18N/mm²であり、実強度は21～24N/mm²以上が通常であることを踏まえると、通用されているコンクリートを使用する条件では、めっき鉄筋はいずれの節においても最大付着応力度の基準値を上回ると考えられる。

一方、図2より、本実験の試験体では、最大付着応力度の基準値を下回るものが確認された。最大付着応力度が約4～5N/mm²であったが、これらの圧縮強度は約10～15N/mm²にあることを確認した。図3より、このように付着低下がいずれの節形状において発生したのは水準3と水準4である。この水準は、水セメント比は低いものの、単位水量が規定範囲外にあるものである。また、水準3と水準4の最大付着応力度は、既往の研究において丸鋼鉄筋で確認された最大付着応力度（約2.7N/mm²程度）に近い。この点を踏まえると、水準3と水準4ではめっき鉄筋とコンクリート間の付着状態が不良になったと推定される。一方、図3より、クロス節を用いた水準11と水準12、竹節を用いた水準9と水準10は、圧縮強度は低いものの、最大付着応力度は基準値を上回ることを確認した。水準9と水準10は水セメント比が規定範囲外、水準11と水準12は水セメント比と単位水量が規定範囲外にあるものの、めっき鉄筋の付着状態は良好していると推定される。しかし、圧縮強度が約10～15N/mm²範囲にある試験体の最大付着応力度は、圧縮強度が約15N/mm²以上である試験体に比べるとばらつきが大きい。この挙動を踏まえると、最大付着応力度の確保には、圧縮強度が設計基準強度以上のものを使用することが安全側であると考えられる。

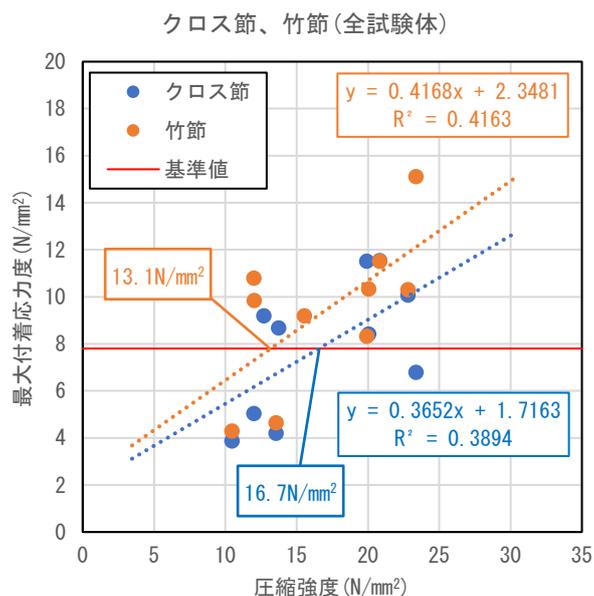


図2 全試験体における最大付着応力度の平均と圧縮強度の関係

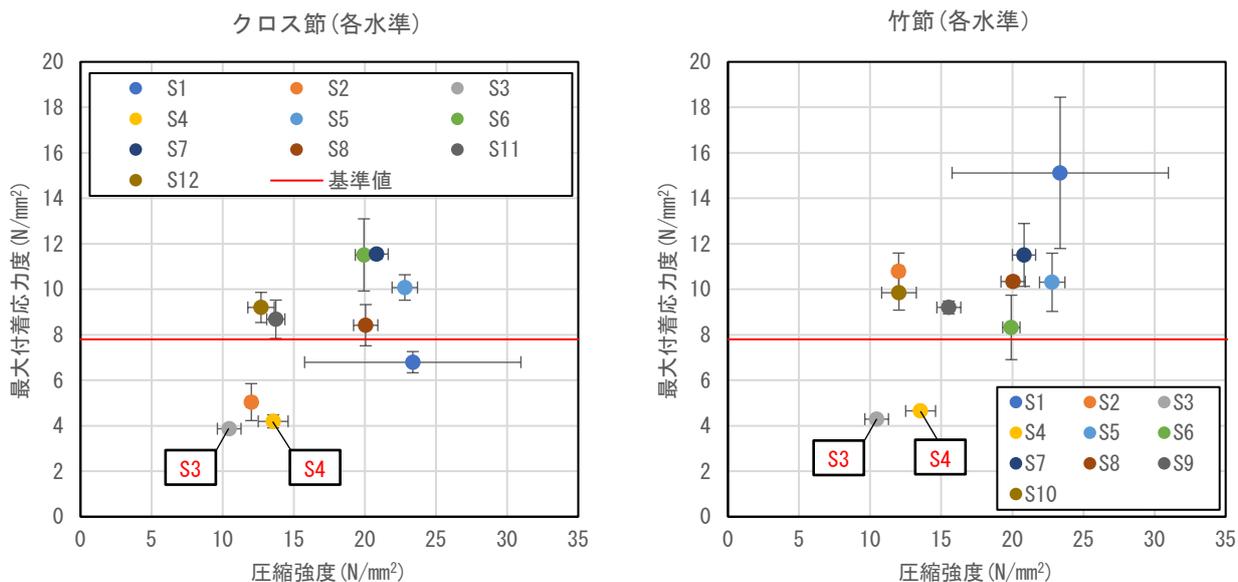


図3 節形状の違いにおける最大付着応力度の平均と圧縮強度の関係

3.2 最大付着応力度と初期(=0.002D時)の付着応力度の関係

図4にクロス節，図5に竹節を用いた試験体における最大付着応力度と初期付着応力度の関係を示す。凡例の0.002D時基準値は，JSTM C 2101Tで定めている鉄筋滑りが0.002D (D：鉄筋径 (mm)) になる時点での付着応力度の基準値 (2.0N/mm²以上) を示し， τ_{max} 時基準値は図2で説明した最大付着応力度の基準値を示す。これ以降は，0.002D時の付着応力度を初期付着応力度と呼ぶ。

図4と図5より，いずれの節形状においても最大付着応力度と初期付着応力度は正の関係にあり，かつ高い相関係数を有することを確認した。また，この関係における近似式の傾きは，竹節がクロス節に比べ約1.11倍大きい。また，最大付着応力度の基準値と初期付着応力度の基準値を境に，各試験体が有する付着応力度をみると，試験体は両方の基準値を上回るか，または両方の基準値を下回る傾向にあることが確認された。これは，初期付着応力度が基準値を満足しない場合，最大付着応力度も基準値を満足しないことになる。これより，初期付着応力度により最大付着応力度を予測できる可能性があると考えられる。本実験の範囲では，節形状の違いにおける近似式と最大付着応力度の基準値の交点を算出した結果，初期付着応力度において，クロス節では約4.9N/mm²以上，竹節では約4.3N/mm²以上であれば，最大付着応力度は基準値を上回ると考えられる。

一方，初期付着応力度が基準値を下回るものは，水準3と水準4はクロス節と竹節の両方で，水準1と水準2はクロス節のみで確認された。水準1と水準2の場合，竹節では両方の基準値を上回ることが確認された。以上のことから，竹節を用いる条件では，クロス節に比べ小さい初期付着応力度においても同等の最大付着応力度を確保でき，また，付着不良の防止においても有利であると考えられる。

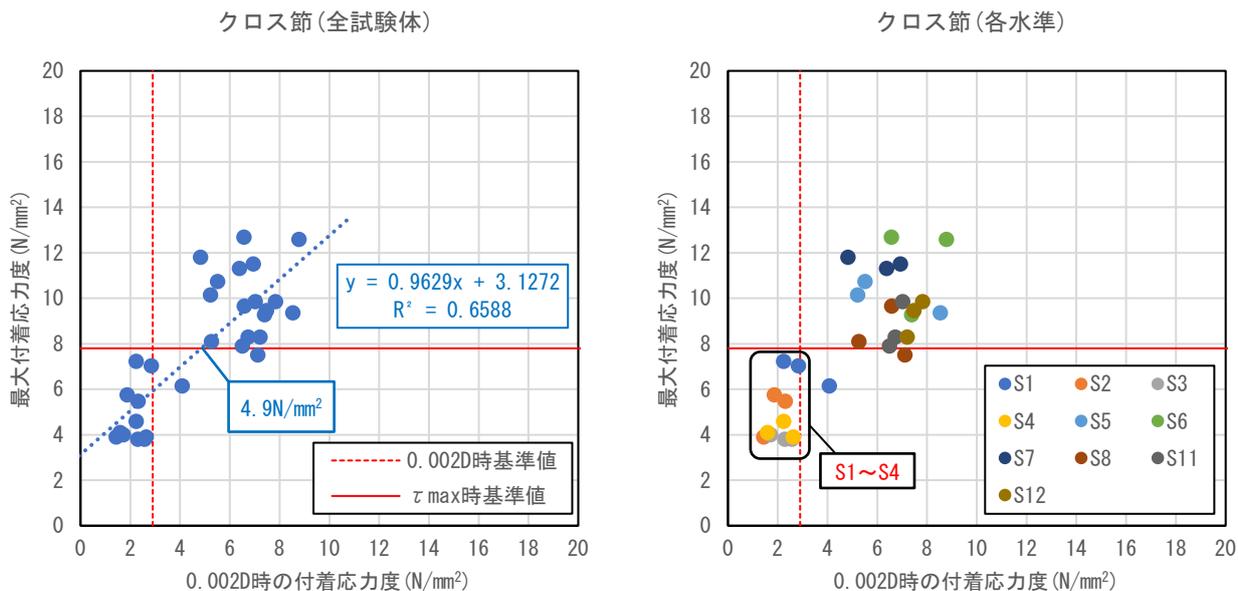


図4 クロス節を用いた試験体における最大付着応力度と0.002D時の付着応力度の関係

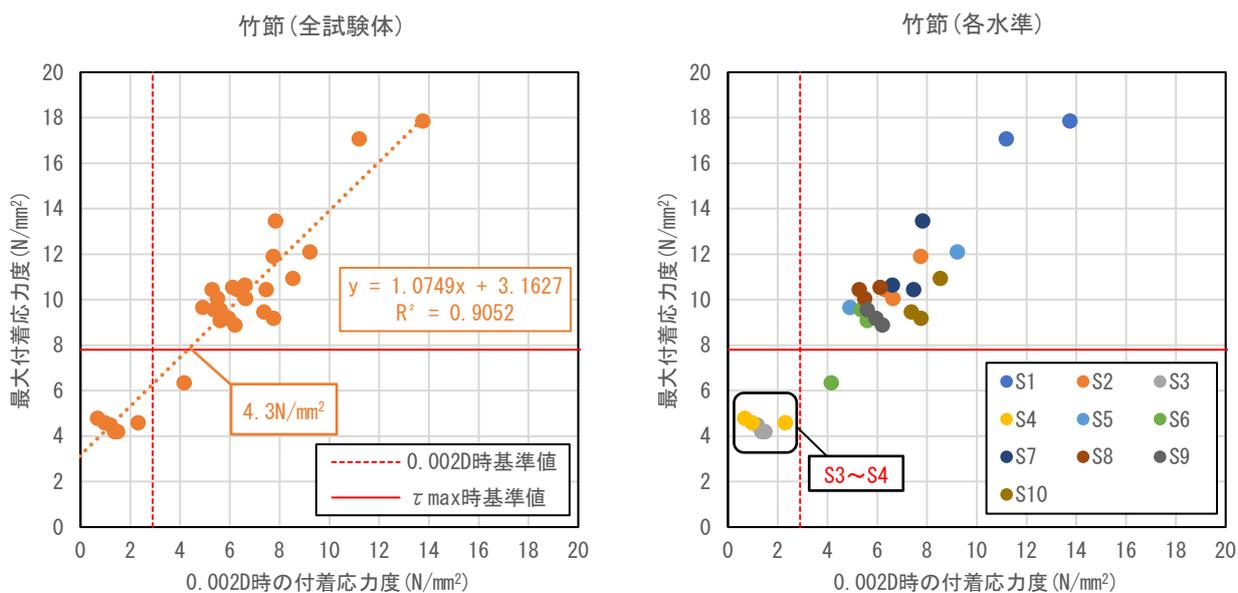


図5 竹節を用いた試験体における最大付着応力度と0.002D時の付着応力度の関係

3.3 最大付着応力度と最大付着応力度時変形の関係

図6にクロス節，図7に竹節を用いた試験体における最大付着応力度と最大付着応力度時変形の関係を示す。図より，最大付着応力度と最大付着応力度時変形は負の関係にあることを確認した。また，近似式と最大付着応力度の基準値の交点を算出した結果，クロス節では約2.1mm，竹節では約1.7mmの最大付着応力度時変形が確認され，最大付着応力度の基準値を満足してもクロス節における鉄筋滑りは竹節に比べ大きい。また，近似式の傾きからみると，竹節での変形はクロス節での変形の約0.45倍程度であるため，クロス節では竹節に比べ最大付着応力度が小さく，最大付着応力度時変形が大きいことを確認できた。これは，最大付着応力度時変形が大きいと，試験体は鉄筋滑りが顕著に発生することになるため，引張力に対する節とコンクリート間の支圧力

を喪失して最大付着応力度が低下したと考えられる。さらに、水準3と水準4は、いずれの節形状においても最大付着応力度時変形が他の水準に比べ大きいことが確認された。このことから、付着応力度に加え、変形においても節形状によるコンクリートとの付着効果は竹節が有利であることがわかる。

以上のことから、めっき鉄筋が付着不良になると、最大付着応力度の低下、初期付着応力度の低下、最大付着応力度時変形の増加が発生することを確認できた。従って、付着性能の確保には、付着応力度に加え、変形の検討も必要と考えられる。また、節形状の違いにおけるめっき鉄筋の付着機構は黒鉄筋と同様であるものの、黒鉄筋と同等の最大付着応力度を示すときの変形はめっき鉄筋が比較的大きいことが推定される。そのため、今後課題ではこの点を明確にする必要があり、現時点ではめっき鉄筋における変形を抑えるために付着応力度は黒鉄筋より大きくする必要があると考えられる。

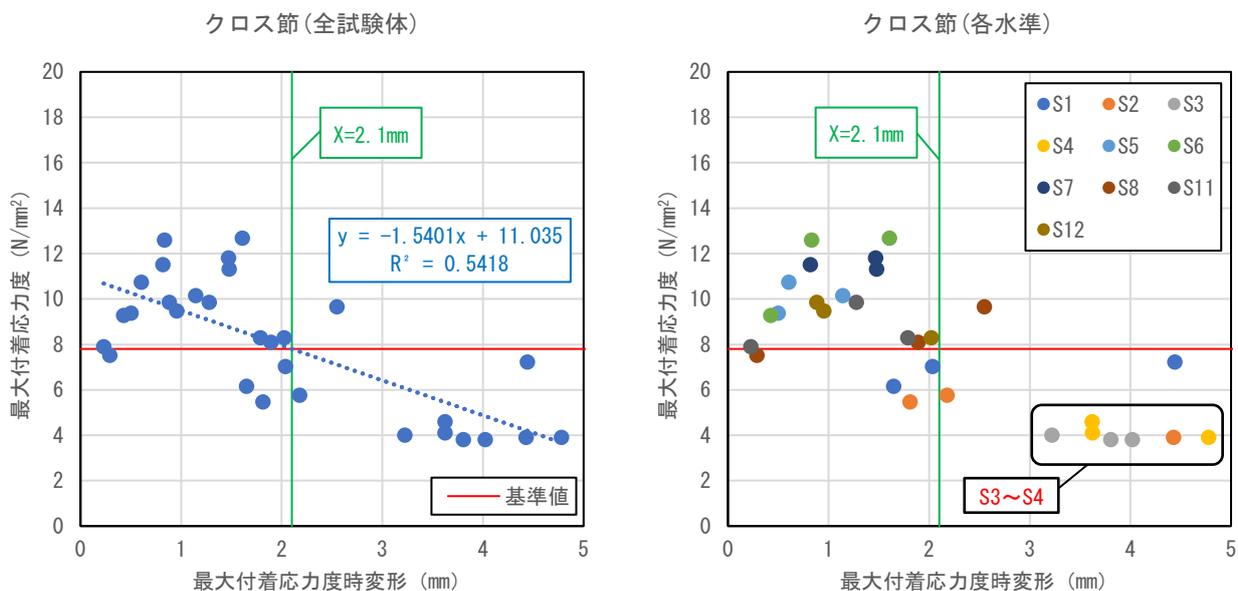


図6 クロス節を用いた試験体における最大付着応力度と最大付着応力度時変形の関係

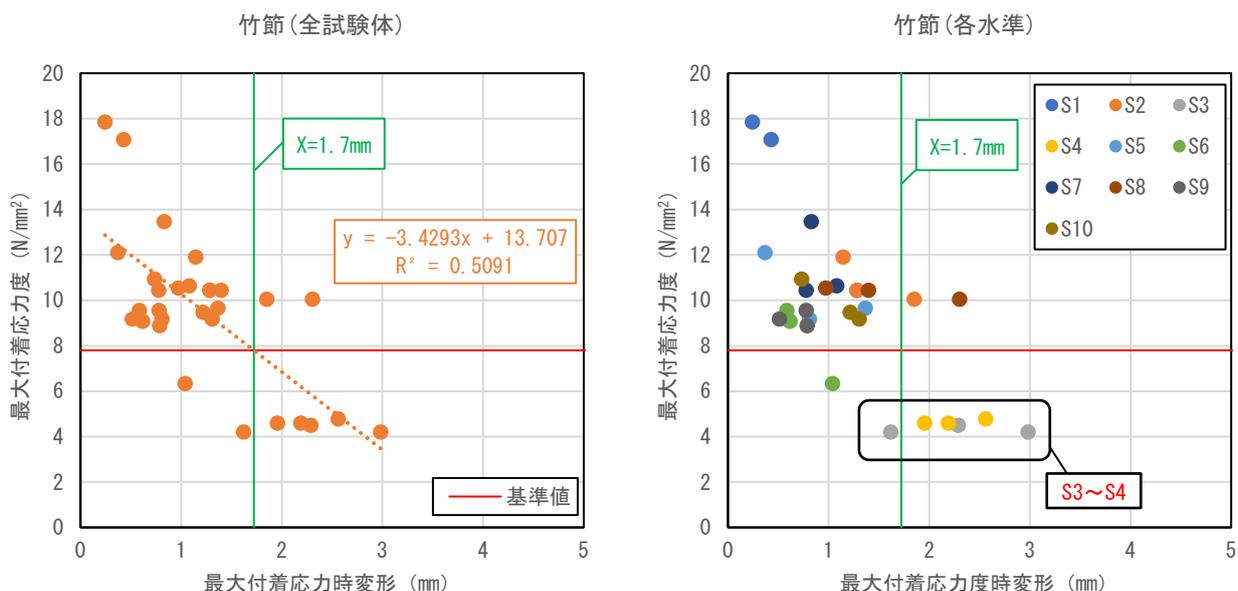


図7 竹節を用いた試験体における最大付着応力度と最大付着応力度時変形の関係

3.4 水セメント比の影響

3.4と3.5では、コンクリート品質として圧縮強度のほかに、水セメント比と単位水量がめっき鉄筋の付着挙動に及ぼす影響を検討する。3.4では水セメント比、3.5では単位水量の違いにおける最大付着応力度および初期付着応力度の挙動を確認する。

図8にクロス節、図9に竹節を用いた試験体における水セメント比と付着応力度（最大付着応力度、初期付着応力度）の関係を示す。凡例の58.5, 71.5, 84.5は水セメント比 (%) を示し、実線の基準値は最大付着応力度の基準値、破線の基準値は初期付着応力度の基準値を示す。その結果、水セメント比の増加における最大付着応力度および初期付着応力度の明確な挙動はみられないことを確認した。水セメント比58.5%の試験体では水準3と水準4があるため、付着不良による付着応力度の低下が影響していると推定されるが、水セメント比71.5%と84.5%の付着応力度を比較すると、いずれの節形状においても最大付着応力度は水セメント比が71.5%、初期付着応力度は水セメント比84.5%の試験体が大きい。最大付着応力度と初期付着応力度が正の関係にあることを踏まえると、本実験の範囲では、水セメント比と付着応力度は相関が少ないと推定される。

図10にクロス節、図11に竹節を用いた試験体において水セメント比の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動を示す。上記と同様に、水セメント比の増加における最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動はいずれの節形状においても明確な相関はみられないことが確認された。水セメント比58.5%を除き、水セメント比71.5%と84.5%を平均値から比較すると、クロス節では水セメント比71.5%の最大付着応力度が大きく、最大付着応力度時変形が小さいが、竹節では、最大付着応力度が大きいのは水セメント比71.5%であるものの、最大付着応力度時変形が小さいのは水セメント比84.5%であった。

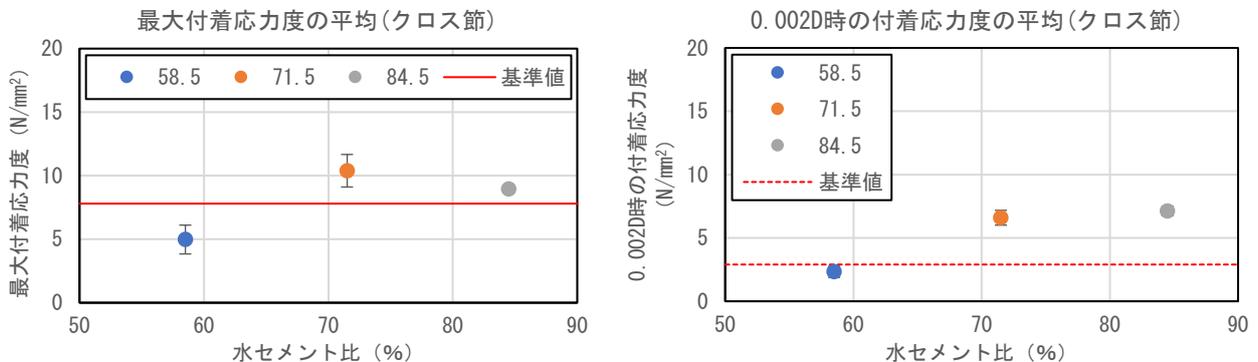


図8 水セメント比の違いにおける最大付着応力度および0.002D時の付着応力度の挙動（クロス節）

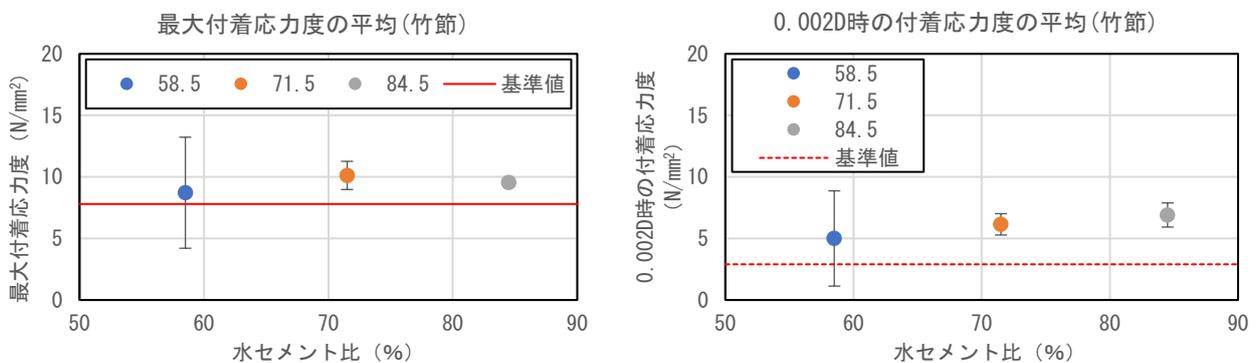


図9 水セメント比の違いにおける最大付着応力度および0.002D時の付着応力度の挙動（竹節）

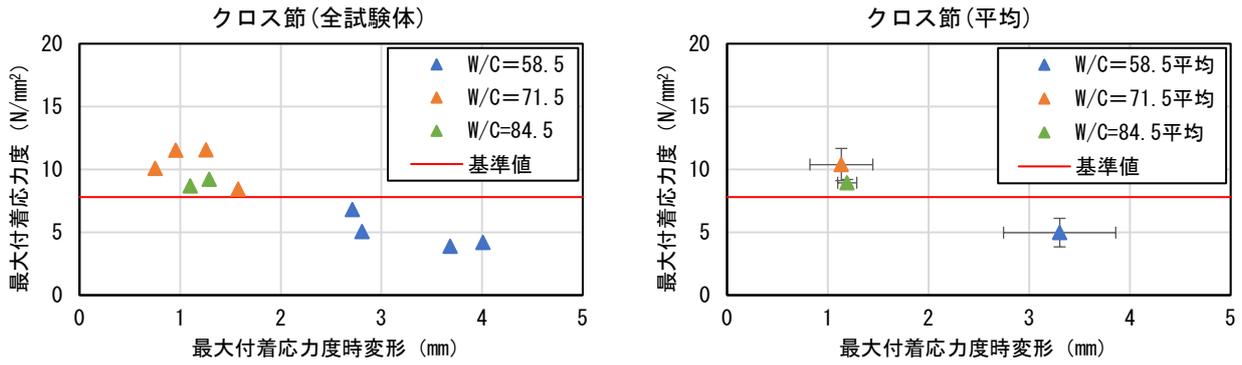


図10 水セメント比の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動（クロス節）

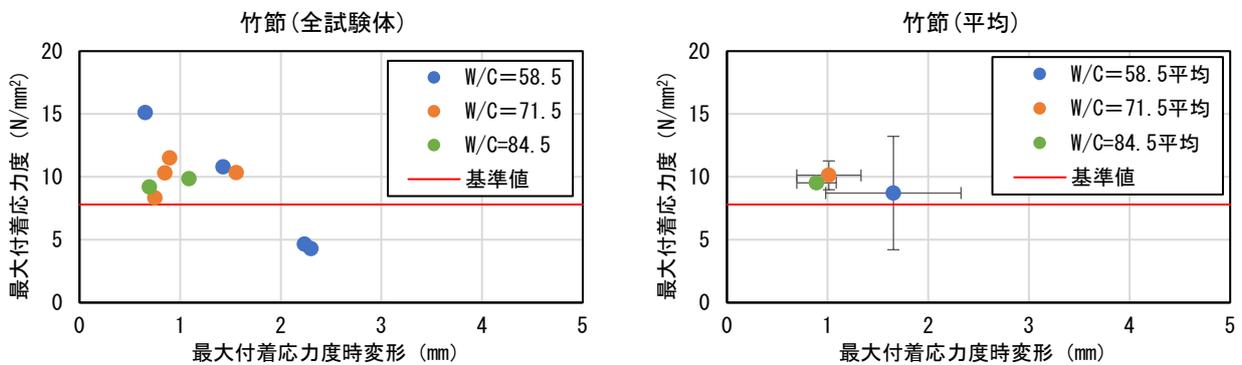


図11 水セメント比の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動（竹節）

3.5 単位水量の影響

図12にクロス節，図13に竹節を用いた試験体における単位水量と付着応力度（最大付着応力度，初期付着応力度）の関係を示す。凡例の166.5，185，203.5，222は単位水量（kg/m³）を示す。その結果，単位水量の増加における最大付着応力度および初期付着応力度は低下する傾向にあることを確認した。これはいずれの節形状においても同様である。また，この結果は最大付着応力度と初期付着応力度の相関ともおおむね一致している。このことから，めっき鉄筋の付着応力度は単位水量の影響を受けていることが確認できた。

図14にクロス節，図15に竹節を用いた試験体において単位水量の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動を示す。その結果，単位水量の増加における最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動は相関があることが確認された。単位水量が小さいほど最大付着応力度は増加し，最大付着応力度時変形は低下することがわかる。この挙動はいずれの節形状においても同様であるが，竹節を用いる条件がクロス節に比べばらつきが小さいことが確認された。以上のことから，本研究の範囲では，めっき鉄筋の付着挙動は単位水量の影響を受けており，竹節を用いると安定した付着性能の確保が可能であることを確認できた。また，単位水量が185kg/m³以下の条件ではいずれの節形状においても最大付着応力度の基準値を上回っていることから，めっき鉄筋は単位水量の小さい条件のコンクリートで使用することが適切と考えられる。

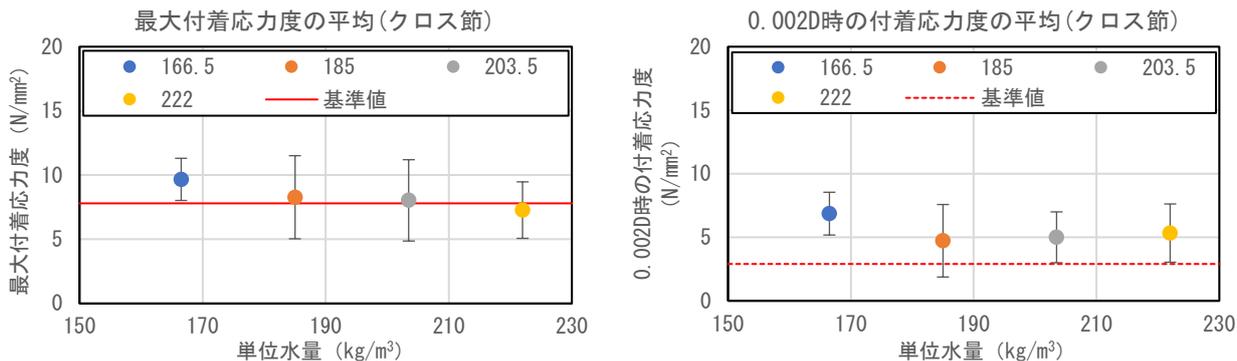


図12 単位水量の違いにおける最大付着応力度と0.002D時の付着応力度の平均の挙動（クロス節）

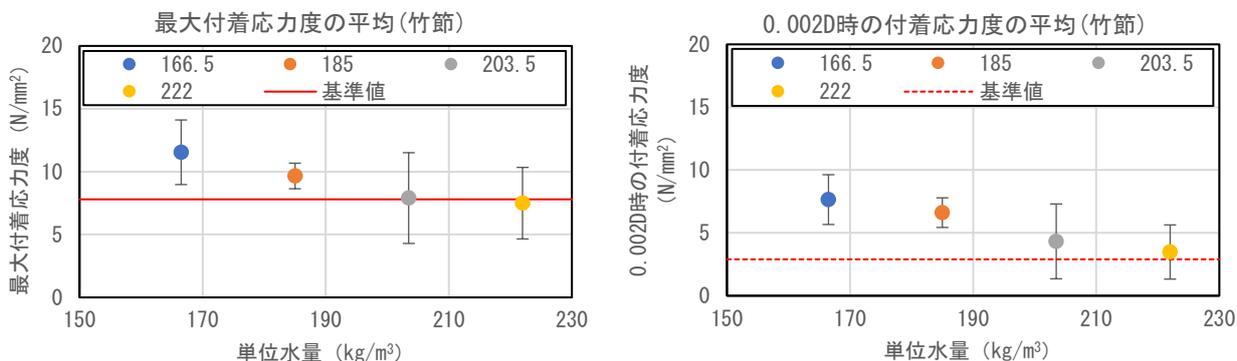


図13 単位水量の違いにおける最大付着応力度と0.002D時の付着応力度の平均の挙動（竹節）

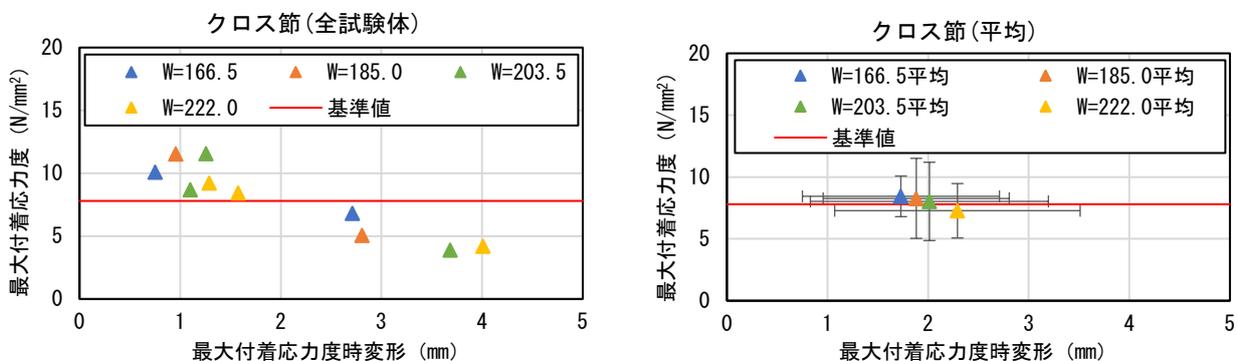


図14 単位水量の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動（クロス節）

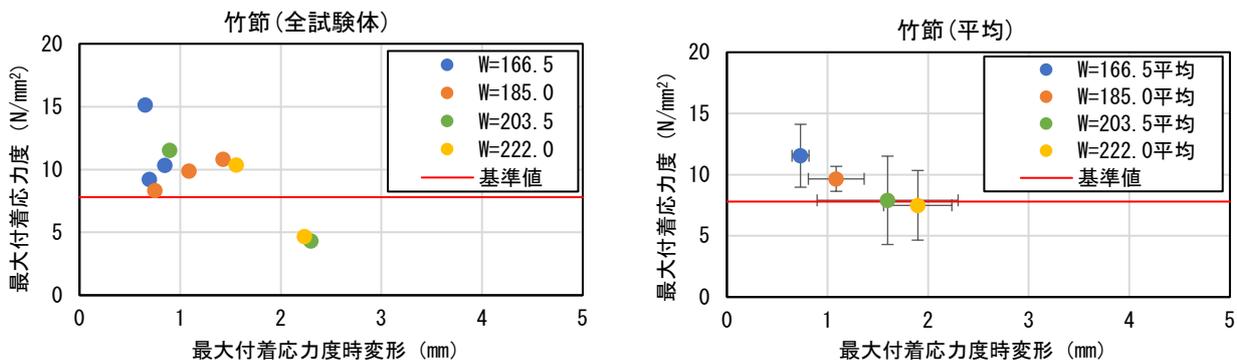


図15 単位水量の違いにおける最大付着応力度と最大付着応力度時変形の挙動（竹節）

3.6 水セメント比および単位水量の違いにおける圧縮強度の挙動

図16に水セメント比，単位水量の違いにおける圧縮強度の挙動を示す。水セメント比と圧縮強度の関係を確認した結果，本実験では水セメント比71.5%，58.5%，84.5%の順で圧縮強度が大きいことを確認した。この順は，図8と図9で確認した最大付着応力度の大きい順と一致している。これは，圧縮強度と最大付着応力度は相関を示すものの，水セメント比との相関は示していないことになる。これより，今後課題では，水セメント比58.5%以下かつ圧縮強度の大きいコンクリートにおけるめっき鉄筋の付着性能を評価し，水セメント比と付着応力度の相関を再検討する必要があると考えられる。

次に，単位水量と圧縮強度の関係を検討した結果，単位水量 166.5kg/m^3 では圧縮強度が大きい，その他の単位水量では圧縮強度が同様であることを確認した。一方で，図12と図13をみると，単位水量が大きいほど付着応力度は低下している。これより，単位水量は圧縮強度との相関はないが，コンクリートとめっき鉄筋間における付着界面の性状に影響していると推定される。このことから，今後課題では，単位水量の違いにおける付着界面の検討が必要と考えられる。

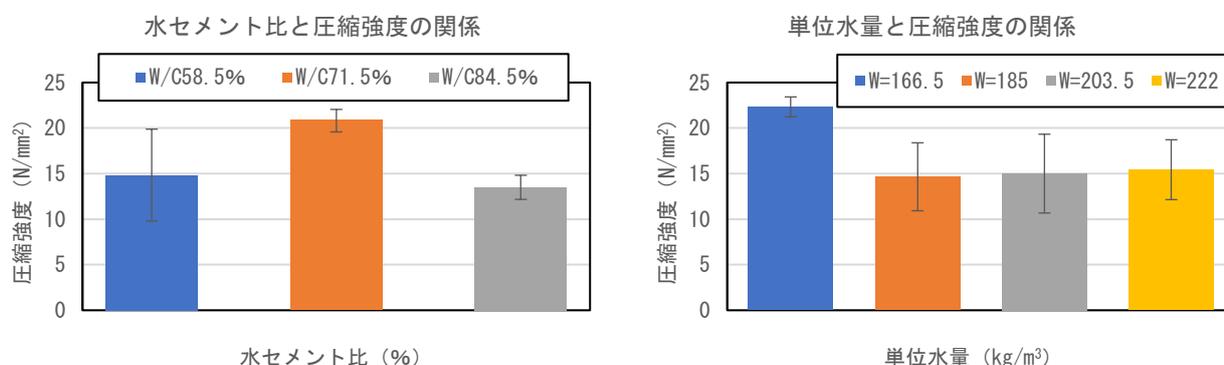


図16 水セメント比（左図）、単位水量（右図）の違いにおける圧縮強度の挙動

4. まとめ

本研究では，健全状態の溶融亜鉛めっき鉄筋（以下，めっき鉄筋）を対象に，めっき鉄筋の付着力に影響する要因としてコンクリート品質（圧縮強度，水セメント比，単位水量）および節形状（クロス節，竹節）の違いが及ぼす付着挙動を評価した。その結果を以下にまとめる。

- ①最大付着応力度と圧縮強度は正の関係にあり，同等の圧縮強度における最大付着応力度は竹節がクロス節に比べ約1.14倍大きいことを確認した。また，実強度 $21\sim 24\text{N/mm}^2$ 以上の通用のコンクリートを使用する条件では，めっき鉄筋はいずれの節においても最大付着応力度の基準値を上回ると考えられる。
- ②最大付着応力度と初期付着応力度は正の関係にあることを確認した。また，竹節を用いる条件では，クロス節に比べ小さい初期付着応力度においても同等の最大付着応力度を確保でき，付着不良の防止においても有利であると考えられる。
- ③最大付着応力度と最大付着応力度時変形は負の関係にあることを確認した。また，めっき鉄筋が付着不良になると，最大付着応力度の低下，初期付着応力度の低下，最大付着応力度時変形の増加が発生することを確認できた。従って，付着性能の確保には，付着応力度に加え，変形の検討も必要と考えられる。
- ④本研究の範囲では，めっき鉄筋の付着挙動は単位水量の影響を受けており，竹節を用いると安定した付着性能の確保が可能であることを確認できた。また，めっき鉄筋は単位水量の小さい条件のコンクリートで使用することが適切と考えられる。